

# CONSIDERACIONES GEOCRONOLÓGICAS E ISOTÓPICAS DEL BATOLITO ANTIOQUEÑO

por

Oswaldo Ordóñez Carmona<sup>1,2</sup>, Márcio M. Pimentel<sup>2</sup>

## Resumen

**Ordóñez C. O. & M. M. Pimentel:** Consideraciones geocronológicas e isotópicas del batolito antioqueño. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **25**(94): 27-35, 2001. ISSN 0370-3908.

El Batolito Antioqueño cubre una área aproximada de 8000 km<sup>2</sup>, y constituye la mayor intrusión calco-alcalina en la parte norte de la Cordillera Central de los Andes Colombianos. Básicamente, consiste de granodioritas y tonalitas. Localmente, se reconocen gabros y facies dioríticas. La facies más común es de grano medio a grueso, con cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa, hornblenda, biotita y minerales accesorios.

Los valores de  $\epsilon_{Nd}(T)$  obtenidos están entre -2.40 y +2.66, y las edades modelo  $T_{DM}$  se encuentran en el intervalo 603 Ma a 1035 Ma. En roca total se obtuvo una edad isocrónica Rb-Sr de  $98 \pm 27$  Ma, interpretada como la mejor estimada para la edad de cristalización del magma original.

**Palabras clave:** Batolito Antioqueño, Cordillera Central, Andes Colombianos

## Abstract

The Antioquian batholith underlies an area of ca. 8000 km<sup>2</sup> being the largest calc-alkaline batholith in the Central Cordillera of the Colombian Andes. The batholith is made mainly of granodiorite and tonalite. Gabbroic and dioritic facies are recognized locally. The most widespread facies consists of a medium to coarse-grained granodiorite with quartz, k feldspar, plagioclase, hornblende, biotite, and accessory minerals.

Nd isotopic compositions indicate  $\epsilon_{Nd}(T)$  values between -2.40 and +2.66 and  $T_{DM}$  model ages ranging from 603 Ma to 1035 Ma. A whole-rock Rb-Sr isochron yielded an age of  $98 \pm 27$  Ma, which is interpreted as the best estimate for age for of crystallization of the original magmas.

**Key words:** Antioquian Batholith, Central Cordillera, Colombian Andes.

1 Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia. AA 1027 Medellín

2 Instituto de Geociencias - Universidad de Brasilia - Brasil. CEP 70910-900. e-mail: osorca@latinmail.com

## Introducción

La presencia de grandes batolitos calco-alcalinos es una de las características más distintivas de la Cordillera de los Andes. En los Andes Colombianos la actividad magmática se ha dado en varios períodos y la presencia de batolitos y "stocks" calco-alcalinos no deja de ser una característica marcante, en especial en la Cordillera Central. En Colombia, este tipo de actividad fue muy significativa durante el Mesozoico, cuando se generaron varias intrusiones y rocas volcánicas.

El Batolito Antioqueño, ubicado en la parte norte de la Cordillera Central es el mayor cuerpo plutónico generado en este período. En su totalidad, se localiza en terrenos del Departamento de Antioquia, al oriente de la ciudad de Medellín.

En su mayor parte, las rocas encajantes son las que constituyen el núcleo metamórfico de la Cordillera Central. El origen y ambiente de formación se considera asociado con los procesos inherentes a la subducción de la placa oceánica de Nazca por debajo de la placa Suramericana.

Sin embargo, la presencia de algunas características de este batolito como son: forma, tamaño, amplio rango de edades K-Ar (entre 63 y 90 Ma) y composición, sugieren que bien puede existir una complejidad en los procesos que participaron en el origen de este batolito.

En este trabajo se presentan datos geocronológicos e isotópicos que pretenden abordar parte de los asuntos antes mencionados, en especial lo referente a la edad de cristalización y la fuente del magma original.

## Geología regional

Durante el Mesozoico, la esquina noroeste de América del Sur experimentó múltiples procesos geológicos, que son en gran parte los principales responsables de las características especiales que se dan en esta región. A partir de datos y estudios geocronológicos, estructurales, petrológicos y dinámicos (Alvarez 1983; McCourt *et al.*, 1984; Etayo & Laverde, 1985; Aspden *et al.*, 1987; Restrepo *et al.*, 1991; Macía 1995; Mojica *et al.*, 1996; Toussaint 1995, 1996; Kerr *et al.*, 1997), se deduce que ciertamente fue durante este período en que los Andes colombianos adquirieron buena parte de su constitución actual, ya que los principales y mayores eventos ígneos, sedimentarios y deformacionales, identificados a lo largo del territorio colombiano, son mesozoicos.

Los Andes colombianos constituyen una compleja e interesante asociación de rocas, estructuras y procesos que son interpretados dentro de modelos moviñistas, enteramente acordes con la dinámica de la tectónica de placas. Según Toussaint & Restrepo (1994), el territorio colombiano está compuesto por cinco diferentes terrenos que fueron adheridos a la placa Suramericana desde el Precámbrico hasta el Cenozoico. En este modelo, la región septentrional de la Cordillera Central hace parte del denominado terreno Tahami, el cual fue acrecionado al territorio colombiano durante el Cretácico Superior.

Este terreno está constituido por un basamento polimetamórfico precámbrico y paleozoico, el cual es intruido por plutones mesozoicos, entre los que se destacan los Batolitos Antioqueño y de Sonsón. En otros sitios, el basamento está cubierto por rocas volcánicas y sedimentarias, mesozoicas y cenozoicas.

El Batolito Antioqueño es la mayor intrusión presente en este terreno cubriendo una área aproximada de 8000 km<sup>2</sup> (Fig. 1). Las rocas encajantes son predominantemente metamórficas regionales de medio a bajo grado (gneises, anfibolitas, esquistos y filitas sugeridas como de edad Paleozoica o Precámbrica); además de rocas sedimentarias y volcánicas del Cretácico Inferior y un cuerpo de dunita serpentinizada aflorante en cercanías a Medellín. El contacto del batolito con estas rocas es discordante y tajante. Igualmente, el batolito intruye plutones cretácicos que varían en composición de gabro a cuarzomonzonitas. La intrusión del batolito ha causado, en algunos lugares, modificaciones significativas en las rocas encajantes, destacándose la sobreimposición de un metamorfismo térmico en el regional.

## Aspectos geológicos del batolito antioqueño

El estudio petrográfico más completo realizado en el batolito es el de Feininger & Botero (1982). Estos autores analizaron petrográficamente 214 muestras de la facies predominante, determinando una composición media de carácter tonalítico (Tabla 1). Igualmente, se destaca el estudio realizado por Alvarez (1983), quien promedió los análisis de 131 muestras (Tabla 1), obteniendo los siguientes porcentajes para los diversos tipos de roca:

Granodioritas	64%
Tonalitas	25%
Cuarzodioritas	5 %
Monzogranitos	4 %
Cuarzo-Monzodioritas	2 %

**Tabla 1.** Composición mineralógica modal media de muestras de la facies predominante del Batolito Antioqueño.

	Feininger & Botero (1982)	Alvarez (1983)
<b>Minerales</b>	<b>Media</b>	<b>Media</b>
Cuarzo	23.9	25.5
Feldespato potásico	6.7	8.6
Plagioclasa	48.4	48.7
Biotita	9.3	7.9
Hornblenda	9.3	7.6
Clinopiroxeno	0.1	
Clorita	1.6	
Accesorios	0.7	

El Batolito Antioqueño es un cuerpo composicionalmente homogéneo en más del 97% de su área expuesta, la facies predominante es granodiorítica y tonalítica. Localmente, afloran facies gabróicas y dioríticas.

La facies litológica más común en el batolito es una roca masiva, hipidiomórfica equigranular de grano medio a grueso, compuesta por cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico, hornblenda, biotita y minerales accesorios.

Es muy común la presencia de enclaves microgranulares intermedios y máficos, que indican, en principio, una mezcla incompleta de magmas ácidos y básicos responsables de la formación de rocas híbridas, lo que sugiere a su vez la presencia de, al menos, dos componentes distintos durante la génesis y evolución del magma.

Las muestras analizadas en este estudio pertenecen a la facies predominante del batolito y fueron colectadas en diferentes afloramientos, especialmente en aquellos lugares en donde se han realizado estudios de petrografía, geoquímica o geocronología (Fig. 1). Son rocas macizas con textura hipidiomórfica granular, de grano medio. Están constituidas por cuarzo anhedral, andesina subhedral a euhedral generalmente zonada y maclada, biotita subhedral de color rojo con inclusiones de circón, hornblenda euhedral verde, a veces con núcleos de piroxeno y ortoclasa intersticial; como accesorios se dan apatito, circón, esfena y opacos. Se presenta clorita como producto de alteración a partir de biotita y hornblenda.

En general, los batolitos cordilleranos se presentan con una dimensión mayor y paralela a la tendencia estructural regional de la cadena. En el caso del Batolito Antioqueño su forma trapezoidal, poco característica para este tipo de intrusiones, se constituye en un interrogante frente a las condiciones geodinámicas bajo las cuales estuvo sometido el territorio colombiano durante el proceso de cristalización de este magma. Esta característica

sumada a la escasa deformación asociada con la intrusión (exceptuando los límites norte y noroccidental), permite sugerir condiciones preferencialmente no compresionales al momento del emplazamiento. Lo anterior hace necesario identificar en el tiempo el momento de este comportamiento, ya que, durante el Cretácico, las condiciones geodinámicas para esta región de la Cordillera Central, reflejan en su mayor parte condiciones compresionales (Toussaint, 1996).

Por otro lado, la homogeneidad petrográfica y petroquímica (Alvarez 1983, Feininger & Botero 1982, Ordóñez 1997), sugiere condiciones especiales para su formación, ya que los plutones cordilleranos son por lo general compuestos.

Análisis K-Ar en biotitas describen un intervalo de edades, entre 63 Ma y 90 Ma. (Pérez, 1967; Botero 1963, Feininger *et al.*, 1972; Restrepo *et al.*, 1991), lo que permite enmarcar el momento de la intrusión durante todo el Cretácico Superior. Considerando que las edades K-Ar solo representan edades de enfriamiento y no necesariamente valores asociados al tiempo de cristalización del magma granodiorítico se hace conveniente determinar el momento de este proceso. Adicionalmente, en regiones como los Andes son muchos los procesos geológicos que pueden darse en este intervalo de tiempo, haciéndose por ello necesario el definir con mayor confiabilidad la edad misma de la cristalización, caso sea posible.

Son pocas las apófisis del Batolito, en principio similares en composición a la facies predominante, pero por ahora no existen datos o estudios que permitan establecer una correlación definitiva. Otros cuerpos que por su asociación espacial y temporal, como los Stocks de San Diego y Altavista, en cercanías a Medellín, así como el Gabro de La Tolda, en jurisdicción de Yarumal, pueden ser correlacionados genéticamente al evento ígneo que originó el batolito. En este trabajo, se presentan datos Sr-Nd de estas intrusiones con el objetivo determinar la relación isotópica entre ellas.

### Geocronología y geoquímica isotópica

Los datos isotópicos obtenidos para las muestras del Batolito fueron determinados utilizando los métodos Rb-Sr y Sm-Nd. Con los análisis Rb-Sr se obtuvo la edad por el método de isócrona en roca total. Los valores de Sm-Nd, sirvieron para calcular las edades modelo ( $T_{DM}$ ), así como los valores respectivos de  $\epsilon_{Nd}$ .

Los análisis isotópicos Sr, Sm y Nd fueron realizados en el Laboratorio de Geocronología de la Universidad de



Brasilia (Brasil), después de obtener concentrados de Sr, Sm y Nd por cromatografía de cambio iónico. Las concentraciones de Sm y Nd se obtuvieron por dilución isotópica usando un "spike"  $^{149}\text{Sm}$ - $^{150}\text{Nd}$ . Los valores de las razones isotópicas se adquirieron utilizando un espectrómetro de masa multi-colector **Finnigan MAT-262**. Las razones isotópicas de Sr y Nd fueron normalizadas con los valores de  $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0.1194$  y  $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ . Las incertidumbres 1s para las razones  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  y  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  son menores que 0.05% y 0.005%, respectivamente.

Las constantes de decaimiento usadas son las recomendadas por Steiger & Jäger (1977) y las edades obtenidas presentan un intervalo de confianza del 95%. Durante el período en que se realizaron los análisis el patrón NBS-987 de Sr presentó valores entre 0.71024 y 0.71029 y el patrón LaJolla de Nd valores entre 0.511828 y 0.511842.

### Método Rb-Sr

La razón  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$  para todas las muestras de este estudio fue calculada a partir de la razón Rb/Sr determinada en el laboratorio de geocronología de la Universidad de São Paulo-USP (Brasil), por fluorescencia de Rayos-X, en general con incertidumbre  $2\sigma < 2\%$ .

Las ocho muestras analizadas fueron colectadas y están distribuidas irregularmente en todo el cuerpo. Se tomaron preferencialmente muestras en los sitios con afloramientos que poseen estudios previos y en donde se han obtenido datos geoquímicos, petrográficos o geocronológicos. Esto garantiza, en lo posible, el estar trabajando con rocas de la facies típica y que ciertamente hacen parte del Batolito.

Los análisis presentan valores de Rb entre 31 a 158 ppm y de Sr entre 57 a 316 ppm (Tabla 2). Los valores de las razones isotópicas  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$  y  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ , fueron utilizados para calcular, por el método de la isócrona, la posible edad de cristalización del Batolito.

Utilizando los 8 datos disponibles se obtiene una edad isocrónica Rb-Sr de  $82 \pm 8$  Ma, con una razón inicial  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  de 0.70473 (Fig. 2). Preliminarmente, con 6 de estas muestras **Ordóñez et al.** (1997), obtuvieron una edad isocrónica Rb-Sr de  $83 \pm 4$  Ma, la cual es semejante a la presentada en este trabajo. Esta edad campaniana ( $82 \pm 8$  Ma), bien puede representar la edad de cristalización del Batolito y es correlacionable con parte de las edades K-Ar obtenidas con anterioridad (**Pérez 1967**, **Botero 1963**, **Restrepo et al.** 1991). Sin embargo, la muestra BA-4, la cual tiene los valores más altos de las razones  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$  (8.02) y  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  (0.71394) y que a su vez define en gran parte la isócrona, es un dique de aplita, valores que son

**Tabla 2.** Resultado de los análisis Rb-Sr del Batolito Antioqueño, rocas asociadas y encajantes. Incertidumbres 1 $\sigma$  en la razón  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  son menores que 0.01% y para las razones  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$  menores que 1%.

Muestra	Rb (ppm)	Sr (ppm)	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$
<b>Bat. Antioqueño</b>				
BA-2	37	255	$0.70488 \pm 5$	0.414
BA-4	158	57	$0.71394 \pm 6$	8.025
BA-6	109	215	$0.70593 \pm 5$	1.467
BA-7	31	270	$0.70494 \pm 5$	0.332
BA-9	67	287	$0.70588 \pm 5$	0.675
BA-12	134	156	$0.70805 \pm 6$	2.485
BA-31	95	215	$0.70678 \pm 5$	1.278
BA-32	72	316	$0.70528 \pm 5$	0.659
<b>Gabro de La Tolda</b>				
GT-1	13	129	$0.70359 \pm 5$	0.291
GT-2	9	124	$0.70356 \pm 5$	0.233
<b>Stock de San Diego</b>				
SSD-1	15	298	$0.70350 \pm 6$	0.146
SSD-3	19	296	$0.70357 \pm 7$	0.186
<b>Stock de Altavista</b>				
SAL-1	18	376	$0.70311 \pm 6$	0.138
<b>Neis de Samaná</b>				
GS-1	131	193	$0.71478 \pm 4$	1.965
<b>Grupo El Retiro</b>				
R-1B	146	185	$0.71832 \pm 5$	2.29

extremadamente diferentes a los obtenidos para las otras 7 muestras. Este, al igual que otros cientos de diques aplíticos que aparecen comúnmente en el batolito, pueden representar líquidos tardíos muy seguramente del magma granodiorítico, los cuales son productos diferenciados, o bien contaminados significativamente; o igualmente pueden pertenecer a un evento ígneo más joven e isotópicamente diferente al del magma granodiorítico. Adicionalmente, la cristalización e intrusión de estos líquidos se dio cuando buena parte del Batolito estaba solidificado; así la muestra BA-4 no cumpliría con uno de los requisitos básicos de la geocronología, que es el de ser muestras cronocorrelacionables. Por ello, la edad ob-

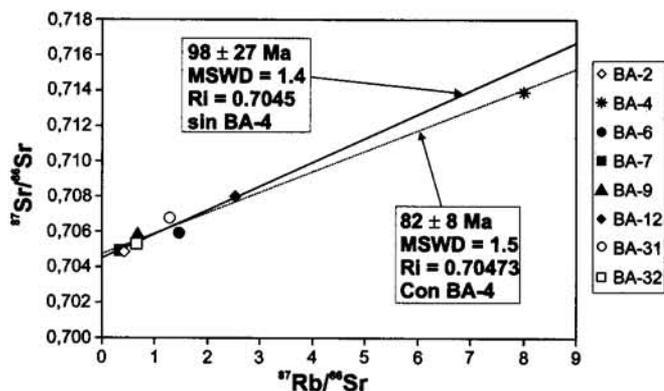


Figura 2. Isocronas Rb-Sr del Batolito Antioqueño

tenida con todas las 8 muestras no se propone como representativa de la edad de cristalización.

Considerando lo anterior, se obtuvo una isócrona Rb-Sr, sin la muestra BA-4, la cual arroja una edad de  $98 \pm 27$  Ma, con una razón inicial  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  de 0.7045 (Fig. 2). La baja razón inicial  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  sugiere la presencia de un importante componente mantélico en el origen del magma parental.

La edad obtenida es cenomaniana y es un poco más antigua que la anterior y se interpreta en este trabajo como siendo la edad de cristalización del Batolito Antioqueño. Sin embargo, el "error" de  $\pm 27$ , hace que la edad pueda estar entre 71 y 125 Ma. En el caso del intervalo entre 71 y 98 Ma, se estaría abarcando un rango de edad semejante al ya determinado por el método K-Ar. Por otro lado, el intervalo entre 98 a 125 Ma, o parte de éste, no es compatible con las evidencias de campo, ya que rocas sedimentarias del Cretáceo Inferior son intruidas por esta masa ígnea.

#### Método Sm-Nd

Se realizaron análisis isotópicos Sm-Nd para 6 muestras del Batolito Antioqueño (Tabla 3).

La edad modelo  $T_{DM}$ , interpretada como siendo la edad de residencia cortical para un material, se obtuvo gráficamente, utilizándose el intercepto con la curva de evolución del manto empobrecido, propuesta por de DePaolo (1981):

Evolución del manto empobrecido - DM (*Depleted Mantle*) =  $0.25T^2 - 3T + 8.5$ , siendo T el tiempo.

El valor de Epsilon de Neodimio ( $\epsilon_{Nd}$ ) en el tiempo "t" se obtuvo utilizando la ecuación de DePaolo & Wasserburg (1976):

$$\epsilon_{Nd} = [ \{ (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{im} / (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR-t}} \} - 1 ] \times 10^4,$$

con valores para el CHUR (*chondritic uniform reservoir*) de:  $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} = 0.512638$  y  $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} = 0.1967$ .

Los datos Sm-Nd obtenidos para estas 6 muestras del Batolito Antioqueño arrojan edades  $T_{DM}$ , de entre 603 Ma (BA-6) hasta 1035 Ma (BA-31). Los valores de  $\epsilon_{Nd}$ , calculados para  $T = 98$  Ma, están entre -2.4 (BA-31) y +2.66 (BA-6). Exceptuando las muestras BA-9 y BA-31, los valores de  $\epsilon_{Nd}$ , son positivos ( $> +1.78$ ), lo que es compatible con una fuente primordialmente de carácter mantélico para el Batolito Antioqueño. Ahora las muestras con valores  $\epsilon_{Nd}$  negativos, sugieren una substancial asimilación de material cortical por el magma batolítico al momento de su emplazamiento. A este respecto y considerando las edades  $T_{DM}$ , la corteza asimilada puede ser tan antigua, isotópicamente, como 1035 Ma.

#### Combinación del par isotópico Sr-Nd

La combinación de los datos isotópicos de Nd y Sr es de mucha importancia en la discriminación de rocas derivadas del manto y aquellas que fueron formadas por fusión de la corteza o que presentan evidencias de contaminación con material cortical. Con los valores de  $\epsilon_{Nd}$  y la razón inicial  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  se construye un diagrama en donde también se presentan las composiciones isotópicas del CHUR y del Bulk Earth (BE).

Adicional a las muestras del Batolito, fueron realizados 5 análisis sobre rocas que hipotéticamente pueden ser consideradas como asociadas al megaevento que generó el Batolito, y que por su composición pueden representar la facies más primitiva del magmatismo cenomaniano (Tabla 2 y 3). Son rocas gabríticas a dioríticas de los plutones de San Diego, Altavista y La Tolda. Igualmente, y considerando la posibilidad de asimilación cortical por parte del magma, se presentan los datos de algunas unidades encajantes como son: Neis de Samaná y rocas del Grupo El Retiro (Tabla 3).

Para el Batolito Antioqueño (Fig. 3) los valores están muy próximos al intercepto de los valores del CHUR y BE (razón  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  del BE = 0.7045), y son ciertamente bien diferentes de los valores presentados por algunas de las rocas encajantes (Neis de Samaná y granitoides de El Retiro).

Las muestras de los plutones asociados presentan valores  $\epsilon_{Nd}$  ( $T = 98$  Ma) altamente positivos ( $> +5.67$ ) y con razones iniciales  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} < 0.7045$ . Estos datos discriminan a estos cuerpos en el campo de las rocas manto derivadas en el diagrama de la figura 3; lo cual es compatible con la composición básica de estas unidades.

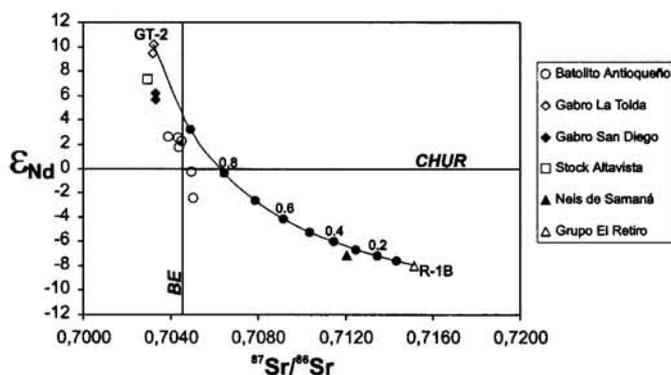
**Tabla 3.** Datos Sm-Nd del Batolito Antioqueño, rocas asociadas y encajantes. Incertidumbres 1s en la razón  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  son menores que 0.005% y para la razón  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$  menor que 0.1%. El valor  $\epsilon_{\text{Nd}(T)}$  fue calculado utilizando la edad isocrónica Rb-Sr de 98 Ma.

Muestra	Sm	Nd	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$\epsilon_{\text{Nd}(98)}$	$T_{\text{DM}}(\text{Ma})$
<b>Bat. Antioqueño</b>						
BA-2	3.21	13.39	$0.512738 \pm 18$	0.1450	2.60	689
BA-6	4.51	20.42	$0.512734 \pm 16$	0.1336	2.66	603
BA-7	5.82	24.14	$0.512723 \pm 14$	0.1458	2.30	728
BA-9	7.56	31.17	$0.512592 \pm 15$	0.1460	-0.26	1012
BA-31	4.04	18.80	$0.512472 \pm 19$	0.1299	-2.40	1035
BA-32	4.40	14.85	$0.512718 \pm 13$	0.1790	1.78	*
<b>Gabro de La Tolda</b>						
GT-1	2.92	8.21	$0.513133 \pm 13$	0.2152	9.43	*
GT-2	2.60	7.04	$0.513177 \pm 14$	0.2231	10.19	*
<b>Stock de San Diego</b>						
SSD-1	2.81	10.32	$0.512908 \pm 13$	0.1649	5.67	*
SSD-3	2.52	9.48	$0.512931 \pm 19$	0.1608	6.17	*
<b>Stock de Altavista</b>						
SAL-1	2.57	9.58	$0.512993 \pm 15$	0.1620	7.36	*
<b>Neis de Samaná</b>						
GS-1	5.95	29.23	$0.512224 \pm 22$	0.1230	-7.16	1365
<b>Grupo El Retiro</b>						
R-1B	7.91	39.40	$0.512180 \pm 17$	0.1210	-7.99	1407

\* Edad  $T_{\text{DM}}$  no calculada. debido al alto valor en la razón  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$

El conjunto de datos permite postular que el Batolito Antioqueño es el producto de la mezcla de, al menos, dos componentes con características isotópicas contrastantes: (i) un miembro derivado del manto empobrecido-DM, enriquecido en neodimio radiogénico, el cual puede ser representado aquí por las rocas gabroicas y dioríticas de los cuerpos asociados y (ii) un miembro félsico derivado de materiales corticales con constituyentes isotópicos precámbricos, aquí representados por las rocas encajantes del Grupo El Retiro y el Neis de Samaná. A manera de ilustración, este resultado puede ser observado gráfica-

mente (Fig.3), en donde las rocas granodioríticas del Batolito Antioqueño, bien pueden ser el resultado de la mezcla de dos miembros extremos (*end members*), siendo ellos el Gabro de La Tolda y las rocas del Grupo El Retiro respectivamente. La curva de mezcla originada por estos dos miembros indica que el magma manto derivado (representado por el Gabro de La Tolda) asimiló, o se contaminó con entre 10 y 20% de materiales corticales (rocas encajantes), representados aquí por las rocas del Grupo El Retiro, material que finalmente cristalizó y formó el Batolito Antioqueño.



**Figura 3.** Diagrama  $\epsilon_{Nd}$  X  $^{87}Sr/^{86}Sr$  (i) del Batolito Antioqueño, cuerpos asociados y rocas encajantes. Valores calculados para 98 Ma. también se presenta la curva de mezcla entre A y B, construida utilizando como miembros extremos, A= GT-2, B = R-1B. Los números indican el valor de la porción del componente A en la mezcla. Para el BE,  $^{87}Sr/^{86}Sr = 0.7045$ . Para el CHUR,  $^{143}Nd/^{144}Nd = 0.512638$  y  $^{147}Sm/^{144}Nd = 0.1967$

## Discusión y conclusiones

El valor MSWD para las edades isocrónicas de 98 y 82 Ma, es de 1.4 y 1.5 respectivamente, garantizando de forma general que los puntos (muestras) se ajustan muy próximos a las rectas que determinan tales isócronas, siendo rectas matemática y paramétricamente semejantes. La diferencia fundamental entre estas dos isócronas está dada por las altas razones  $^{87}Sr/^{86}Sr$  y  $^{87}Rb/^{86}Sr$  que la muestra BA-4 presenta, la cual es la que prácticamente define la inclinación de la recta en la figura 2, en otras palabras la que determina la edad de  $82 \pm 8$  Ma.

La edad isocrónica Rb-Sr de  $82 \pm 8$  Ma, considerando la muestra de aplita, bien que puede representar la edad de cristalización y tanto el valor de 82 Ma, así como el "error" de  $\pm 8$  Ma son compatibles con las propuestas y resultados presentados por los varios geólogos que han realizado trabajos en el batolito, sin embargo, el desconocimiento que se tiene sobre la verdadera fuente de estos diques no permite, en principio, asumir esta edad como la de cristalización del batolito, ya que ellos bien pueden representar los líquidos tardíos (diferenciados o contaminados con material cortical) o bien pertenecer a otro evento ígneo isotópicamente diferente. Serán los estudios posteriores sobre las aplitas que podrán resolver esta duda y tal vez, confirmar la validez de esta edad.

Siendo conservadores con uno de los postulados básicos de la geocronología para materiales a ser datados, esto es: el de tener la propiedad de ser muestras cronoco-

rrrelacionables y cogenéticas; la edad isocrónica Rb-Sr de  $98 \pm 27$  Ma, se sugiere aquí como la mejor estimación para la edad de cristalización del Batolito Antioqueño. Esta edad, es marcadora en lo que respecta a considerar las condiciones que prevalecieron durante este período en la parte septentrional de la Cordillera Central. En otras palabras, el límite Cretácico Inferior - Superior en Colombia es significativo, ya que, las condiciones no compresionales bajo las cuales fue instruido el Batolito Antioqueño, deben responder a un proceso geodinámico más regional, el cual pudo estar influenciando la zona en donde se generó y emplazó el magma granodiorítico.

Son varios los trabajos que citan la intensa actividad de plumas y generación importante de material oceánico para el período entre 120 y 90 Ma en especial para la zona del pacífico (Kerr *et al.* 1997, Kerr 1999). Por otro lado, la deformación y acreción de terrenos es igualmente citada como prevaleciente durante buena parte del Mesozoico (Toussaint & Restrepo 1994, Toussaint 1996, Moores, 1998). Es en este marco geotectónico regional fue en donde se dieron las condiciones propicias para la génesis y cristalización del magma granodiorítico. Estos dos ambientes antagónicos, no impiden que pueda postularse un modelo simplificado para el origen del Batolito.

En el Cretácico Inferior, la génesis de abundante corteza, representada por el Plateau Colombia-Caribe (Kerr *et al.* 1997, Kerr 1999), imprimió una dinámica singular para la región Caribe y Pacífica de Sur América, esto se tradujo entre otras cosas en la acreción de terrenos oceánicos y las deformaciones y esfuerzos compresionales asociados. En este marco hipotético, es factible que la velocidad de subducción de la placa oceánica, que en aquel momento subducía por debajo de la región en donde se generó el Batolito Antioqueño, fuese dos o tres veces mayor a la que hoy tiene la placa de Nazca (actualmente es de 6-7 cm/a), esto ciertamente puede condicionar un ambiente apropiado para la abundante actividad magmática. Una velocidad de subducción  $> 15$  cm/a, facilita la entrada continua y abundante de corteza hidratada al manto, la deshidratación de esta, a profundidad, permitió la fusión de una cantidad significativa de la cuña del manto litósferico, siendo la mayor parte del magma emplazado - cristalizado al momento de la disminución radical en la velocidad de subducción, en donde puede darse igualmente condiciones no compresionales. Esta disminución está asociada a la culminación de la actividad misma de la pluma que generó el Plateau oceánico, hace entre 100 y 90 Ma.

Los primeros pulsos de este magmatismo, bien pueden ser los magmas básicos asociados con la formación de los

Stocks de San Diego, Altavista y el Gabro de La Tolda, todos ellos de características isotópicas (Sr-Nd) manto-derivadas. Ya el Batolito Antioqueño, presenta características isotópicas Sr y Nd que indican ser el producto de la mezcla de, en lo mínimo, dos componentes, uno derivado del manto empobrecido - DM, con razones iniciales  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} < 0.7045$  y valores de  $\epsilon_{\text{Nd}}$  positivos, y el otro representado por las rocas encajantes con edades hasta precámbricas y de carácter cortical.

### Agradecimientos

Para la realización de este estudio se contó con la colaboración, del Instituto de Geociencias de la Universidad de Brasilia (laboratorio de Geocronología), de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín, del laboratorio de Geocronología de la Universidad de São Paulo (por los análisis de fluorescencia de rayos-X) y el apoyo financiero del CNPq y CAPES de Brasil.

### Referencias

- Alvarez J. 1983. Geología de la Cordillera Central y el Occidente Colombiano y petroquímica de los intrusivos granitoides Mesocenoicos. *Boletín Geológico de Ingeominas*, **26**(2): 1-175.
- Aspden J. A., McCourt W. J., Brook M. 1987. Geometrical control of subduction - related magmatism: the Mesozoic and Cenozoic plutonic history of western Colombia. *Journal of the Geological Society, London*, **144**: 893-905.
- Botero A. G. 1963. Contribución al conocimiento de la geología de la zona central de Antioquia. *Anales Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia-sede Medellín*, **57**: 1-101.
- Depaolo, D. J. 1981. Neodymium isotopes in The Colorado Front Range and crust-mantle evolution in the Proterozoic, *Nature*, **291**: 193-196.
- \_\_\_\_\_ & Wasserburg, G. J. 1976. Nd isotopic variations and petrogenetic models. *Geophy. Res. Lett.* **3**(5): 249-252
- Etayo F. & Laverde F. 1985. Proyecto Cretácico. *Publicaciones Geológicas Especiales del Ingeominas* **16**, Cap. I a XXX.
- Feininger, T.; Barrero, D., Castro, Q. N. 1972. Geología de parte de los departamentos de Antioquia y Caldas (Sub-zona II-B). *Boletín Geológico de Ingeominas*, **20**(2): 1-173.
- \_\_\_\_\_ & Botero, G. 1982. The Antioquian Batholith, Colombia. *Publicaciones Geológicas Especiales del Ingeominas* **12**: 1-50.
- Kerr A. C. 1999. Oceanic Plateau Formation: a cause of mass extinction and black shale deposition around the Cenomanian-Turonian boundary. *Journal Geology Society of London*, **155**: 619-626
- \_\_\_\_\_, Marriner G. F., Tarney J., Nivia A., Saunders A. D., Thirlwall M. F., Sinton C. W. 1997. Cretaceous basaltic terranes in Western Colombia: elemental, chronological and Sr-Nd isotopic constraints on petrogenesis. *Journal of Petrology*, **38**(6): 677-702.
- Macía C. 1995. El magmatismo Triásico Superior - Jurásico en Colombia. Breve síntesis. *Geología Colombiana*, **20**: 163-164.
- McCourt W. J., Aspden J. A., Brook M. (1984). New geological and geochronological data from the Colombian Andes: continental growth by multiple accretion. *Journal Geology Society of London*, **141**: 831-845.
- Mojica J., Kammer A., Ujueta G. 1996. El Jurásico del sector noroccidental de Suramérica y guía de la excursión al Valle Superior del Magdalena (Nov. 1-4/95), regiones de Payandé y Prado, Departamento del Tolima, Colombia. *Geología Colombiana*, **21**: 3-40.
- Moore E. M. 1998. Ophiolites, the Sierra Nevada, "Cordillera", and orogeny along the Pacific and Caribbean margins of North and South America. *International Geology Review*, **40**: 40- 54.
- Ordóñez, C. O. 1997. O Pré-Cambriano na parte norte da Cordilheira Central dos Andes colombianos (Dissertação de Mestrado), Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Brasília-Brasil, 99p.
- \_\_\_\_\_, Pimentel, M.m., Celino, J.J., Gioia, S., Restrepo, J.J., Saenz, E., Paucar, C. 1997. Age and Sr-Nd isotopic characteristics of the Antioquian Batholith; Cordillera Central, Colombian Andes. *The South-American Symposium on Isotope Geology, Brazil*. p. 216-218.
- Pérez, G., 1967. Determinación de la edad absoluta de algunas rocas de Antioquia por métodos radioactivos. *Dyna, Univ Nacional, Medellín*. **84**: 27-31.
- Restrepo, J.J., Toussaint, J.F., González, H., Cordani, U., Kawashita, K., Linares, E., Parica, C. 1991. Precisiones geocronológicas sobre el Occidente colombiano. *Simp. sobre Magm. And. y su marco Tect.*, Manizales, Colombia. p. 1-21.
- Steiger, R. H. & Jäger, E. 1977. Subcommission on geochronology: convention on the use of decay constants in geo - and cosmochronology. *Earth and Planetary Sciences Letters*, **36**: 359-362.
- Toussaint J. F. 1995. *Evolución Geológica de Colombia durante el Triásico y Jurásico*. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, 94 p.
- \_\_\_\_\_ 1996. *Evolución Geológica de Colombia durante el Cretácico*. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, 277 p.
- \_\_\_\_\_ & Restrepo J. J. 1994. The Colombian Andes during Cretaceous times. In: *Cretaceous tectonics of the Andes*. Ed. Vieweg & Sohn, Wiesbaden: 61-100.